

Contribution de l'Effet du Balancement des Bras sur la Marche d'un Robot Bipède

B. Kaddar, Y. Aoustin, C. Chevallereau

*Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes
(IRCCyN)(UMR CNRS 6597)*

(e-mail : bassel.kaddar@irccyn.ec-nantes.fr

Yannick.Aoustin@irccyn.ec-nantes.fr

Christine.Chevallereau@irccyn.ec-nantes.fr).

Résumé : Une marche cyclique est définie pour un robot bipède plan sur un sol horizontal. Le but est d'étudier l'influence du mouvement des membres supérieurs du bipède sur la consommation d'énergie du bipède. Le cycle de marche est constitué de phases de simple appui et d'impacts. Différentes cas pour les bras seront comparés : bras attachés, petits mouvements des bras et balancement des bras. Pour chaque cas une optimisation paramétrique du mouvement de marche sera réalisée pour mettre en évidence l'effet de balancement des bras.

Keywords: bipède, locomotion, bras, critère d'énergie, optimisation de trajectoire.

1. INTRODUCTION

Plusieurs études sur la définition d'allure de marche ont été faites (Mu and Wu, 2006; Tlalolini et al., 2010). De nombreux chercheurs ont obtenu des trajectoires de marche en utilisant l'optimisation. Roussel et al. (1998) ont proposé des méthodes de génération de trajectoires en minimisant un critère qui est fonction de la consommation d'énergie. Chevallereau and Aoustin (2001) ont utilisé des polynômes de quatrième degré afin de définir le mouvement dans l'espace articulaire. L'optimisation paramétrique est réalisée par la minimisation d'un critère des couples ou d'un critère énergétique. La commande optimale a été mise en œuvre dans (Bessonnet et al., 2004) pour la génération de la marche d'un bipède planaire.

Des approches de génération des mouvements des membres supérieurs ont été utilisées pour compenser le moment angulaire autour de l'axe vertical, visant à améliorer la stabilité pendant la marche d'un robot (Xing and Su, 2010). Une méthode de contrôle a été proposée pour générer le mouvement des bras dans le cas 3D tout en tenant compte un critère de stabilité (Kajita et al., Oct. 2003). Shafii et al. (2009) ont trouvé que leur modèle de contrôle est plus efficace et rend la marche du robot plus stable et rapide s'ils considèrent le rôle des bras.

Peu d'études et de résultats existent pour décrire les effets des bras sur les allures de marche dynamique d'un bipède. Collins (April 2008); Collins et al. (2009) ont étudié l'effet du balancement des bras sur la réduction d'énergie. Les études se déroulent en deux parties. Une première phase consiste à étudier l'effet des bras sur un robot passif simple. Une seconde partie est consacrée à l'étude du mouvement des bras et de leur effets sur des sujets humains. Les deux études ont montré que le mouvement des bras permet de réduire les variations du moment angulaire durant la marche et ainsi de réduire la

consommation d'énergie. Aoustin and Formal'skii (2008, 2009) ont cherché des allures de marche balistique du bipède avec des couples impulsionsnels. Ils ont montré qu'il existe une amplitude optimale du balancement des bras pour laquelle le coût énergétique est minimal. Les couples nécessaires pour la marche ne sont fournis qu'à l'instant de l'impact. Cependant il n'est pas encore montré si l'effet des mouvements actifs ou passives des bras peut réduire la consommation d'énergie pendant la marche d'un robot bipède où le système locomoteur est totalement actionné.

Notre but est donc de comparer les effets des différents modes de balancement des bras en fonction de la consommation énergétique selon un critère donné pour un robot bipède complètement actionné dont le mouvement n'est pas balistique.

Nous avons testé trois modes d'évolution des bras : mode bras attachés de telle manière à former un seul corps avec le tronc, mode bras oscillant faiblement par rapport au tronc et un mode où les bras se balancent librement en amplitude par rapport au tronc. Cela nous a conduit à utiliser deux modèles différents pour notre robot afin d'effectuer cette étude : un bipède à six articulations et un bipède à dix articulations. Seules les phases de marche cyclique sont abordées dans cette étude, les phases de démarrage et d'arrêt ne sont pas étudiées.

Le robot étudié est présenté dans la section 2. La section 3 est dédiée à la modélisation dynamique du robot bipède. Le mouvement de marche cyclique est défini Section 4. La stratégie d'optimisation est expliquée Section 5. Dans la section 6, des trajectoires optimales de marche sont obtenues pour différents modes de mouvement des bras et sont comparées suivant un critère énergétique. La section 7 présente les conclusions et perspectives.

*. Ce travail est fait dans le cadre de projet ANR 'R2A2'.

2. PRÉSENTATION DU ROBOT ET CYCLE DE MARCHÉ

Le robot bipède étudié est muni de deux pieds et comporte deux jambes identiques qui sont dotées de trois articulations, un tronc, deux bras à deux articulations : chaque bras est composé d'un bras supérieur et d'un avant-bras (figure 1). Le modèle 2D est défini à partir des caractéristiques physiques du robot humanoïde expérimental HYDROiD. Le robot humanoïde HYDROiD est conçu pour avoir des paramètres géométriques et dynamiques proches de ceux du modèle de HANAVAN qui caractérise l'être humain (Alfayad, Novembre 2009). Les paramètres physiques du HYDROiD sont fournis dans le tableau 1. Toutes les articulations sont rotoïdes. Les frottements sont supposés négligeables au niveau des articulations motorisées.

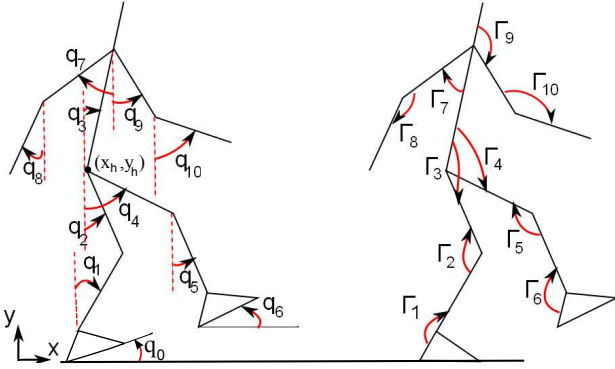


FIGURE 1. Configurations et couples du robot bipède dans le plan sagittal

TABLE 1. Paramètres physiques du robot bipède

Description	Masse Kg	Longueur m	CdM m	Inertie $Kg.m^2$
Pied	0.678	$L_p=0.207$ $h_p=0.06425$	$sp_x=0.0135$ $sp_y=0.03212$	0.00175
Tibia	2.188	0.392	0.1685	0.0276
Cuisse	5.025	0.392	0.1685	0.0664
Tronc	24.97	0.5428	0.2013	0.6848
Bras supérieur	1.3	0.293	0.1260	0.0455
Avant-bras	0.85	0.293	0.1686	0.0093

Dans ce travail, on s'intéresse à la génération d'une allure de marche cyclique qui est composé de phase de simple appui pied à plat et d'impact pour un robot bipède plan qui dispose de dix articulations. Les coordonnées généralisées du bipède sont des angles absolus, définis par rapport à l'axe vertical.

3. MODÈLE DU ROBOT

Par la suite on notera $\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ ...q_n]^t$ le vecteur définissant la configuration du robot en appui sur le pied de support en fonction des orientations absolues des articulations où $n = 6$ ou 10 selon le modèle considéré du bipède.

3.1 Modèle Dynamique du Bipède dans la Phase de Simple Appui

Le modèle dynamique du bipède durant la phase de simple appui est exprimé dans le repère (x, y) et s'écrit sous la forme suivante :

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}\mathbf{\Gamma} \quad (1)$$

où $\mathbf{\Gamma} = [\Gamma_1 \ \Gamma_2 \ ... \ \Gamma_n]^t$ est le vecteur des couples articulaires, $\mathbf{A}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'inertie, elle est symétrique, définie positive, $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ représente les forces de Coriolis et les forces centrifuges, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ représente le vecteur de la gravité et dépend uniquement de \mathbf{q} et $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'actionnement, c'est une matrice constante et inversible.

Le modèle, présenté par l'équation (1), est valide seulement si le pied d'appui reste fixe, c'est à dire si il n'y pas de décollement ni de glissement ni de rotation du pied d'appui. La force de réaction de sol sur ce pied \mathbf{R}_1 pendant la phase de simple appui est calculée en écrivant l'équilibre dynamique du robot bipède.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{1x} \\ \mathbf{R}_{1y} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_g \\ \ddot{\mathbf{y}}_g \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2)$$

où m est la masse totale du bipède, \mathbf{x}_g et \mathbf{y}_g sont les composantes horizontale et verticale du centre de gravité du bipède, \mathbf{R}_{1x} et \mathbf{R}_{1y} sont les composantes horizontale et verticale de la force de réaction du sol sur le pied de support.

Le **ZMP** (Zero Moment point) est calculé à partir de l'équilibre des moments autour du pied d'appui (figure 2) :

$$\mathbf{ZMP}_x = \frac{\mathbf{\Gamma}_1 + sp_x m_p g - h_p \mathbf{R}_{1x}}{\mathbf{R}_{1y}} \quad (3)$$

Compte tenu que les efforts de réaction produits par le sol sont unilatérales, le pied reste en contact pied à plat seulement si le point de **ZMP** reste strictement à l'intérieur de l'enveloppe convexe dans la zone de support de pied d'appui (Shuuji Kajita and Yokoi, 2009).

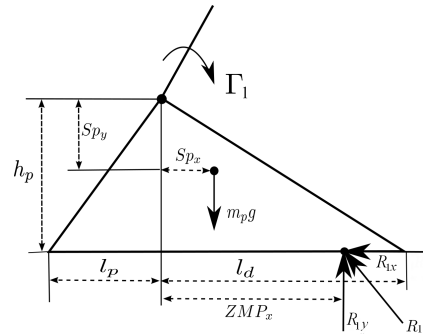


FIGURE 2. Forces et moments qui agissent sur le pied d'appui.

3.2 Modèle Dynamique en Phase de Double Appui Instantanée

On note $\mathbf{X}_h = [x_h, y_h]$ la position de la hanche et q_0 comme étant l'angle entre le pied de support et le sol. La position

et les configurations du robot seront alors définies par le vecteur $\mathbf{X} = [q_0; \mathbf{q}; x_h; y_h]$. Le modèle dynamique en phase de double appui doit prendre en compte l'action du sol sur le robot. Le modèle dynamique du bipède lors de la phase de double appui est :

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{G}(\mathbf{X}) = \mathbf{B}_e\mathbf{\Gamma} + \mathbf{J}_1^t\mathbf{R}_1 + \mathbf{J}_2^t\mathbf{R}_2 \quad (4)$$

où $\mathbf{A}(\mathbf{X})$ est la matrice d'inertie et ses éléments dépendent du vecteur \mathbf{X} , $\mathbf{C}(\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})$ représente les forces de Coriolis et les forces centrifuges, $\mathbf{G}(\mathbf{X})$ représente le vecteur de la gravité, \mathbf{B}_e indique si une articulation est actionnée ou non, \mathbf{J}_1 et \mathbf{J}_2 sont les matrices jacobiniennes des contraintes des pieds et $\mathbf{R}_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ et $\mathbf{R}_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ sont les vecteurs de réaction de sol sur les pieds.

Au cours de la marche bipède, l'impact se produit à la fin d'une phase de simple appui lorsque la jambe en transfert touche le sol. Deux cas peuvent se présenter : soit le pied d'appui décolle après l'impact, soit les deux pieds restent sur le sol. Dans le premier cas, la composante verticale de la vitesse de chaque extrémité de pied qui décolle juste après l'impact doit être positive. La réaction du sol sur la jambe qui décolle doit être nulle $\mathbf{R}_1 = 0$. La composante verticale de réaction de sol sur le pied d'appui juste après l'impact est positive (Aoustin and Formal'skii, 2008). Dans la suite, nous n'avons considéré que le premier cas. Le deuxième cas est difficile à obtenir et coûte très chères en énergie. La phase de double appui est donc supposée instantanée.

Le modèle d'impact est obtenu par l'intégration de l'équation (4) pendant la durée de l'impact qui tend vers zéro. Le modèle d'impact peut être écrit comme :

$$\mathbf{A}(\mathbf{X})(\dot{\mathbf{X}}^+ - \dot{\mathbf{X}}^-) = \mathbf{J}_2^t\mathbf{R}_2 \quad (5)$$

où $\dot{\mathbf{X}}^-$ et $\dot{\mathbf{X}}^+$ sont les vecteurs des vitesses juste avant l'impact et juste après l'impact respectivement, $\mathbf{R}_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ représente les réactions impulsives du sol sur le pied d'appui au moment de l'impact. La vitesse du pied qui arrive au sol est nulle :

$$\mathbf{J}_2\dot{\mathbf{X}}^+ = 0 \quad (6)$$

On obtient ainsi les efforts impulsifs qui agissent juste après l'impact sur pied qui heurte le sol $\mathbf{R}_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ et le vecteur des vitesses $\dot{\mathbf{X}}^+$.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & -\mathbf{J}_2^t \\ \mathbf{J}_2 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}^+ \\ \mathbf{R}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}\dot{\mathbf{X}}^- \\ 0_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pour une telle résolution, on considère les hypothèses suivantes :

- (1) L'impact existe à l'instant précis où le pied libre reprend contact avec le sol pied à plat.
- (2) L'impact est instantané.
- (3) La configuration du robot est constante durant l'impact.
- (4) Il y a une variation instantanée des vitesses articulaires au moment de l'impact.

4. DÉFINITION DU MOUVEMENT DE MARCHÉ CYCLIQUE

On ne s'intéresse ici qu'à la marche cyclique, c'est à dire que tous les pas sont symétriques. Chaque pas est associé à un balancement de l'un des deux pieds.

Des fonctions polynomiales de temps $\mathbf{q}_i(t)$ sont utilisées pour définir les évolutions des variables généralisées \mathbf{q} afin de calculer une trajectoire. Les coefficients de ces fonctions polynomiales sont calculées à partir des configurations et vitesses articulaires initiales et finales. Cependant afin d'éviter le contact entre le pied et le sol durant la phase de marche il est nécessaire de fixer des angles intermédiaires \mathbf{q}_{int} . Les trajectoires $\mathbf{q}_i(t)$ sont donc choisies comme étant n polynômes de degré quatre.

$$\mathbf{q}_i(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 \quad \text{for } i=1 \text{ to } n \quad (8)$$

Puisque les allures recherchées sont cycliques, les configurations et les vitesses initiales \mathbf{q}_{ini} , $\dot{\mathbf{q}}_{ini}$ respectivement peuvent être déduites à partir des configurations et vitesses après l'impact \mathbf{q}^+ , $\dot{\mathbf{q}}^+$ respectivement en échangeant le rôle des articulations du pas courant au pas suivant.

$$\mathbf{q}_{ini} = \mathbf{E}\mathbf{q}^+, \quad \dot{\mathbf{q}}_{ini} = \mathbf{E}\dot{\mathbf{q}}^+ \quad (9)$$

où $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice des permutations.

Une fois que les positions, les vitesses et les accélérations sont déterminées, les couples nécessaires à l'exécution du mouvement à chaque instant sont entièrement connus à partir du modèle dynamique donné par l'équation (1) et la réaction de sol est calculée par l'équation (2).

5. OPTIMISATION DES TRAJECTOIRES

5.1 Le Critère d'Optimisation

L'objectif est de trouver une trajectoire optimale qui permette de minimiser un critère énergétique C_Γ . Il porte sur la norme des couples par l'unité de distance parcourue d pendant un pas de marche cyclique.

$$C_\Gamma = \frac{1}{d} \int_0^T \mathbf{\Gamma}^t \mathbf{\Gamma} dt \quad (10)$$

où T est la durée d'un pas de marche.

Notre objectif est de minimiser le critère d'énergie choisi en trouvant les valeurs optimales des variables d'optimisation par une procédure d'optimisation paramétrique sous contraintes non linéaires. Une méthode de programmation quadratique séquentielle est utilisée pour optimiser la trajectoire de référence en utilisant la fonction MATLAB *fmincon* (Barclay et al., 1997). Cette fonction permet d'optimiser une fonction objective sous des contraintes linéaires et non-linéaires. Les variables d'optimisation sont définies dans la section suivante.

5.2 Les Variables d'Optimisation

Les variables d'optimisation utilisées pour le robot à dix articulations sont :

- La distance parcourue d est une variable d'optimisation et la vitesse de marche V est fixe. La durée d'un pas est donc directement donnée par la relation $T = d/V$.
- sept paramètres pour définir la configuration finale du bipède à l'impact juste avant le contact avec le sol et qui sont les coordonnées de la hanche x_h, y_h , l'angle de tronc q_3 par rapport l'axe vertical et 4 paramètres pour les bras. A partir de la position de la hanche et la distance d , les configurations finales des membres inférieurs du robot sont calculées en utilisant le modèle géométrique inverse. La cyclicité du mouvement est prise en compte par l'échange du rôle des pieds pour déduire \mathbf{q}_{ini} de \mathbf{q}^- .
- $n = 10$ paramètres des vitesses finales juste avant l'impact $\dot{\mathbf{q}}^-$. Les vitesses articulaires juste après l'impact $\dot{\mathbf{q}}^+$ sont définies à partir de $\dot{\mathbf{q}}^-$ et des équations (7).
- $n = 10$ paramètres pour la configuration intermédiaire \mathbf{q}_{int} du robot.

Nous avons donc $3n - 2 = 28$ paramètres d'optimisation pour le robot bipède à dix articulations qui permettent de calculer tous les coefficients des fonctions polynomiales. Pour le robot à six articulations il n'y a que $3 \times 6 - 2 = 16$ paramètres d'optimisation

5.3 Les Contraintes d'Optimisation

Pour que les trajectoires obtenues soient réalisables il faut tenir compte des contraintes suivantes :

- (1) Contraintes de contact avec le sol, pendant la phase de simple appui et l'impact :
 - Contraintes de non décollement du pied d'appui pendant la phase de simple appui : il est nécessaire de contraindre la réaction du sol sur le pied d'appui de sorte à qu'elle soit toujours positive.

$$\mathbf{R}_{1y} > 0 \quad (11)$$

- La résultante des efforts de contact pied-sol mène à définir les contraintes de non-glissement telle que :

$$\mu \mathbf{R}_{1y} \geq |\mathbf{R}_{1x}| \quad (12)$$

où μ représente le coefficient de frottement entre le pied et le sol.

- Les conditions de non-basculement du pied sont satisfaites si le ZMP reste à l'intérieur de la surface de contact pied-sol déterminée par la semelle du pied (figure 2).

$$-l_p \leq \mathbf{ZMP}_x \leq l_d \quad (13)$$

- Contraintes supplémentaires lors de l'impact : Les vitesses du talon et des orteils du pied qui décolle du sol juste après l'impact doivent être positives, et le pied venant en contact avec le sol ne doit pas glisser ni rebondir à l'impact.

$$\begin{cases} V_{heel} \geq 0 \\ V_{toe} \geq 0 \end{cases} \quad (14)$$

- Des contraintes géométriques qui éviteront les collisions des deux extrémités du pied en transfert avec le sol au cours de la phase de simple appui. Ces contraintes s'écrivent :

$$\begin{cases} y_{heel} > 0 \\ y_{toe} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

où y_{heel} et y_{toe} sont les hauteurs de talon et des orteils du pied en transfert respectivement.

- (2) Contraintes technologiques : Ces contraintes sont des limitations introduites sur les couples actionneurs et sur les variables d'état qui décrivent les mouvements articulaires en position et en vitesse.

Les couples articulaires sont bornés :

$$|\Gamma_i| - \Gamma_{i,max} \leq 0, \quad \text{pour } i = 1, \dots, n \quad (16)$$

où $\Gamma_{i,max}$ désigne la valeur maximale de couple pour chaque actionneur.

Chaque actionneur produit une vitesse maximale limite :

$$|\dot{\mathbf{q}}_i| - \dot{\mathbf{q}}_{i,max} \leq 0, \quad \text{for } i = 1, \dots, n \quad (17)$$

où $\dot{\mathbf{q}}_{i,max}$ représente la valeur maximale de vitesse pour chaque actionneur.

Les limites supérieures et inférieures des articulations pour les configurations lors du mouvement sont :

$$\mathbf{q}_{i,min} \leq \mathbf{q}_i \leq \mathbf{q}_{i,max}, \quad \text{for } i = 1, \dots, 6 \quad (18)$$

où $\mathbf{q}_{i,min}$ et $\mathbf{q}_{i,max}$ sont respectivement les limites minimales et maximales de position.

Les résultats d'optimisation sont représentés dans la section suivante.

6. SIMULATION

Les trajectoires du robot bipède sont optimisées et les coûts énergétiques de marche sont calculés pour les cas suivants :

- A. Mode Balancement Normal où les mouvements des bras sont obtenus pour le robot bipède avec dix articulations.
- B. Les bras effectuent des petits débattements par rapport au tronc au cours du mouvement. Le but est de limiter le mouvement des bras de telle sorte qu'ils soient le plus solidaires possible du tronc. Les vitesses et positions relatives des bras par rapport au tronc ne peuvent pas être imposées égales à zéro d'une manière continue à cause de l'impact. Les bras ne seront pas donc solidaires en permanence du tronc mais leurs mouvements seront très limités. Cette condition est obtenue en imposant que les vitesses et positions relatives des bras (bras supérieurs et avant-bras) par rapport le tronc juste avant l'impact sont nulles. Cela peut être exprimé par :

$$\begin{cases} q_j^- - q_3^- = 0 \\ \dot{q}_j^- - \dot{q}_3^- = 0 \end{cases} \quad (19)$$

où $j = 7, 8, 9, 10$ et l'indice $-$ indique que la valeur de variable associée est pris juste avant l'impact. Après l'impact, les vitesses des bras diffèrent un peu de celles du tronc. Pour les deux précédents modes de mouvement, le robot étudié a dix articulations et l'architecture est celle montrée par la figure 1.

- C. Mode Bras Attachés où le robot bipède est composée de six articulations seulement. Ici, la masse et l'inertie des bras sont intégrées à celles du tronc.

En effectuant des optimisations pour plusieurs vitesses de marche et pour les différents modes d'évolution des bras, nous avons trouvé différentes allures de marche.

6.1 Mode Balancement Normal

Pour les allures optimales obtenues, les bras se balancent avec des amplitudes très élevées qui dépassent 180° . Pour obtenir des débattements plus conventionnelle des bras, il faut borner le mouvement des bras. Différentes manières peuvent être utilisées pour atteindre ce but, par exemple en mettant des contraintes sur les vitesses maximales des actionneurs des bras, ou en limitant les angles relatifs (bras, tronc) et (bras supérieurs, avant-bras) par des butées articulaires. Ce qui a été fait avec les valeurs :

$$\begin{cases} q_7 - q_3 \leq \theta_{max1} & q_9 - q_3 \leq \theta_{max1} \\ q_8 - q_7 \leq \theta_{max2} & q_{10} - q_9 \leq \theta_{max2} \end{cases} \quad (20)$$

La figure 3 montre une allure optimale pour un tel mouvement où les valeurs maximales des angles relatifs (bras, tronc) et (bras supérieurs, avant-bras) sont fixées à 60° degrés.

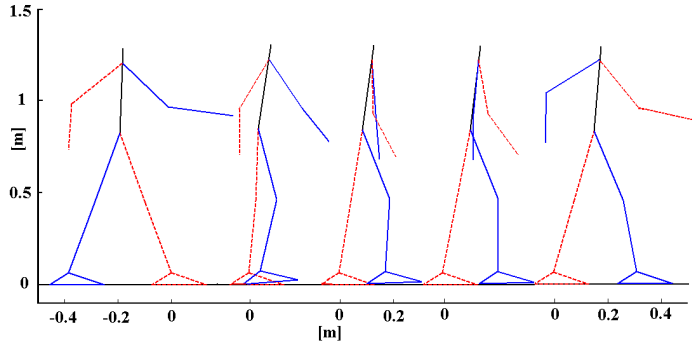


FIGURE 3. Allure de marche pour une vitesse de marche de $V = 0.9 \text{ m/s}$ et $\theta_{max1} = 60^\circ$ et $\theta_{max2} = 60^\circ$.

6.2 Mode de petites amplitudes des bras

Les bras effectuent des petits débattements par rapport au tronc. La figure 4 montre l'allure obtenue pour une vitesse de marche de 0.9 m/s .

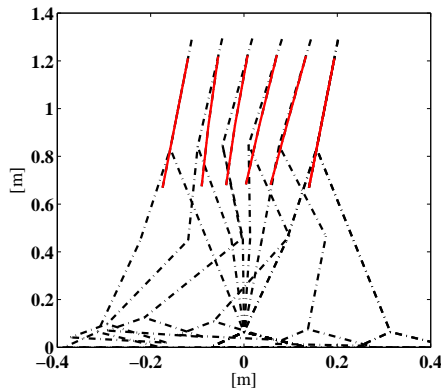


FIGURE 4. Allure de marche avec un balancement de petites amplitudes pour une vitesse de marche de 0.9 m/s .

6.3 Mode Bras Attachés

La figure 5 montre l'allure obtenue pour une vitesse de marche de 0.9 m/s .

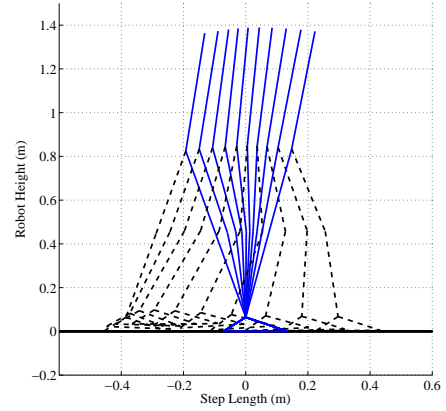


FIGURE 5. Allure de marche du bipède avec bras attachés pour une vitesse de marche de 0.9 m/s .

6.4 Résultats et discussion

Les solutions optimales sont obtenues pour les différents types d'évolution des bras pour plusieurs vitesses de marche. Les valeurs de critère d'énergie sont calculées et tracées en fonction des vitesses de marche (figure 6). La courbe en trait plein représente les résultats d'optimisation pour le robot à dix articulations avec des butées articulaires $\theta_{max1} = 60^\circ$ et $\theta_{max2} = 60^\circ$. Une allure de marche pour une vitesse $V = 0.9 \text{ m/s}$ est présentée figure 3. Pour les grandes vitesses de marche, les trajectoires obtenues avec le balancement des bras semblent plus intéressantes vis-à-vis du critère d'énergie par rapport aux trajectoires du robot équivalant sans les bras (où les bras sont considérés comme attachés au tronc). Dans le cas où les bras sont mobiles il est toujours plus intéressant de balancer les bras alors que les trajectoires coûtent plus chères si les bras se balancent avec de petites oscillations.

Pour les deux cas : le balancement normal et avec de petites oscillations, nous avons recalculé l'énergie consommée dans les bras en utilisant le même critère mais en ne considérant que les couples appliqués aux bras (dans les épaules et les coudes). La figure 7 montre que le balancement des bras n'est pas un mouvement passif pour l'allure de marche optimale composée de phases de simple appui et d'impact. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des actionneurs aux articulations des épaules et des coudes afin d'obtenir ce mouvement optimal avec balancement des bras. Les couples maximaux appliqués aux actionneurs des bras sont plus élevés lorsque les bras se balancent alors qu'il faut des couples moins élevés pour garder les bras le plus possible solidaires du tronc (en mode petites oscillations). Mais le fait d'actionner les bras requiert des couples moins importants pour les autres articulations du robot bipède.

Il sera intéressant d'explorer l'influence de mouvement passive des bras sur la marche et comparer ce mouvement avec

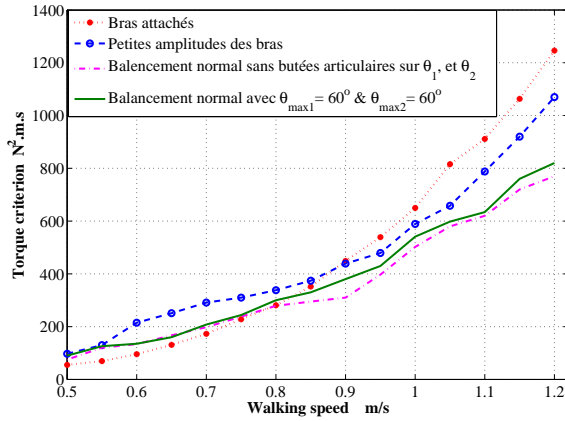


FIGURE 6. Évolution du critère d'énergie en fonction de la vitesse de marche; θ_1 et θ_2 sont respectivement les angles relatifs (bras, tronc) et (bras supérieurs, avant-bras).

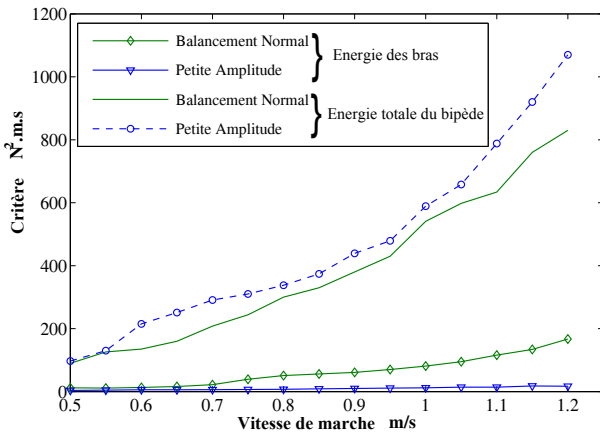


FIGURE 7. Évolution de l'énergie totale du robot et celle des bras en fonction de la vitesse de marche; le balancement normal est avec $\theta_{max1} = 60^\circ$ et $\theta_{max2} = 60^\circ$.

le mouvement où les bras sont actionnés pour accomplir cette étude.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Des allures de marche optimales avec balancement des bras ont été étudiées ici. Pour les grandes vitesses et lorsque les bras se balancent, la consommation énergétique du robot bipède est moins élevée alors qu'elle est plus élevée dans les cas où il n'y a pas de bras ou lorsque les bras se balancent en mode petites oscillations. Nous avons trouvé que ce mouvement optimal du balancement des bras n'est pas passif pour les allures composées d'une phase de simple appui et un impact. Le fait d'actionner les bras diminue les couples délivrés par les actionneurs au système locomoteur du robot bipède. La consommation d'énergie globale est donc moindre. Les perspectives est de considérer un mouvement de marche cyclique phase qui soit composé de phases de simple appui, des phases de double appui avec rotation des pieds et d'impact.

L'influence d'un mouvement passif des bras sur le système locomoteur sera explorée.

RÉFÉRENCES

- Alfayad, S. (Novembre 2009). Robot humanoïde hydroïd : Actionnement, structure cinématique et stratégie de contrôle. *Thèse de Doctorat de l'Université Versailles Saint Quentin, Paris*.
- Aoustin, Y. and Formal'skii, A. (2008). On optimal swinging of the biped arms. *International Conference on Intelligent Robots, IROS 2008.*, 2922 – 2927.
- Aoustin, Y. and Formal'skii, A. (2009). 3d walking biped : Optimal swing of the arms. *In Personnal communication with the author*.
- Barclay, A., GILL, P.E., and ROSEN, J.B. (1997). Sqp methods and their application to numerical optimal control. *Report NA 97-3, Department of Mathematics, University of California, San Diego, USA*.
- Bessonnet, G., Chessé, S., and Sardain, P. (2004). Optimal gait synthesis of a seven-link planar biped. *The Int. J. of Robotics Research*, 33, 1059 – 1073.
- Chevallereau, C. and Aoustin, Y. (2001). Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot. *Robotica*, 19, 557 – 569.
- Collins, S.H. (April 2008). Dynamic walking principles applied to human gait. *Ph.D. University of Michigan*.
- Collins, S.H., Adamczyk, P.G., and Kuo, A.D. (2009). Dynamic arm swinging in human walking. *Proceedings of the Royal Society B : Biological Sciences*, 276, 3679–3688.
- Kajita, S., Kanehiro, F., Kaneko, K., Fujiwara, K., Harada, K., Yokoi, K., and Hirukawa, H. (Oct. 2003). Resolved momentum control : humanoid motion planning based on the linear and angular momentum. *Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003)*, 2, 1644 – 1650.
- Mu, X. and Wu, Q. (2006). A complete dynamic model of five-link bipedal walking. *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, 6, 4926 – 4931.
- Roussel, L., Canudas-De-Wit, C., and Goswami, A. (1998). Generation of energy optimal complete gait cycles for biped robots. *Proceedings. 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 3, 2036 – 2041.
- Shafii, N., Khorsandian, A., Abdolmaleki, A., and Jozi, B. (2009). An optimized gait generator based on fourier series towards fast and robust biped locomotion involving arms swing. *ICAL '09. IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 2018 – 2023.
- Shuuji Kajita, Hirohisa Hirukawa, K.H. and Yokoi, K. (2009). Introduction à la commande des robots humanoïdes. *Springer*.
- Tlalolini, D., Aoustin, Y., and Chevallereau, C. (2010). Design of a walking cyclic gait with single support phases and impacts for the locomotor system of a thirteen-link 3d biped using the parametric optimization. *Multibody System Dynamics*, 23, 33 – 56.
- Xing, D. and Su, J. (2010). Arm/trunk motion generation for humanoid robot. *SCIENCE CHINA Information Sciences*, 53, 1603 – 1612.